

(19) 日本特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-121892

(P2003-121892A)

(43) 公開日 平成15年4月23日 (2003. 4. 23)

(51) Int.Cl. ⁷		識別記号	F I	データ* (参考)	
G 0 2 F	1/355	5 0 1	G 0 2 F	1/355	5 0 1 2 H 0 7 9
C 0 1 B	31/02	1 0 1	C 0 1 B	31/02	1 0 1 F 2 K 0 0 2
G 0 2 F	1/01		G 0 2 F	1/01	Λ 4 G 0 4 6
G 1 1 B	7/24	5 3 8	G 1 1 B	7/24	5 3 8 Λ 5 D 0 2 9
	7/26	5 3 1		7/26	5 3 1 5 D 1 2 1
審査請求 未請求 請求項の数19 O L (全 10 頁)					
(21) 出願番号 特願2001-320383(P2001-320383)			(71) 出願人 301021533 独立行政法人産業技術総合研究所 東京都千代田区霞が関 1-3-1		
(22) 出願日 平成13年10月18日 (2001. 10. 18)			(71) 出願人 000005496 富士ゼロックス株式会社 東京都港区赤坂二丁目17番22号		
			(72) 発明者 梶原 陽一 茨城県つくば市東 1-1-1 独立行政法 人産業技術総合研究所 つくばセンター内		
			(74) 代理人 100079049 弁理士 中島 淳 (外 3 名)		
最終頁に続					

(54) 【発明の名称】 光学素子およびその製造方法

(57) 【要約】

【課題】 光学素子へシングルウォール・カーボンナノチューブを応用することで、通信波長領域で動作可能で、かつ極めて低コスト・高効率な非線形の光学素子およびその製造方法を提供すること。

【解決手段】 シングルウォール・カーボンナノチューブが積層された薄膜を有し、かつ、その可飽和吸収機能を利用することを特徴とする光学素子、および、シングルウォール・カーボンナノチューブを分散媒に分散させて分散液を調製し、該分散液を被塗物にスプレー塗布することにより薄膜を形成することを特徴とする光学素子の製造方法である。

【特許請求の範囲】

【請求項1】 シングルウォール・カーボンナノチューブが積層された薄膜を有し、かつ、その可飽和吸収機能を利用することを特徴とする光学素子。

【請求項2】 前記薄膜が、基板表面に形成されてなることを特徴とする請求項1に記載の光学素子。

【請求項3】 前記薄膜が、光学材料表面または光学素子表面に形成されてなることを特徴とする請求項1に記載の光学素子。

【請求項4】 前記薄膜が、シングルウォール・カーボンナノチューブを分散媒に分散させた分散液を用い、これをスプレー塗布することにより形成された薄膜であることを特徴とする請求項1～3のいずれか1に記載の光学素子。

【請求項5】 前記分散媒が、アルコールであることを特徴とする請求項4に記載の光学素子。

【請求項6】 前記シングルウォール・カーボンナノチューブの1.2～2.0 μm 帯における可飽和吸収を利用することを特徴とする請求項1～5のいずれか1に記載の光学素子。

【請求項7】 前記シングルウォール・カーボンナノチューブの直径が、1.0～1.6 nmであることを特徴とする請求項6に記載の光学素子。

【請求項8】 前記薄膜の可飽和吸収に伴う透過率変化により、光スイッチング動作を示すことを特徴とする請求項1～7のいずれか1に記載の光学素子。

【請求項9】 1.2～2.0 μm 帯において光スイッチング機能を有することを特徴とする請求項8に記載の光学素子。

【請求項10】 前記薄膜が鏡面体表面に形成されてなり、可飽和吸収ミラーの機能を有することを特徴とする請求項1～7のいずれか1に記載の光学素子。

【請求項11】 1.2～2.0 μm 帯において可飽和吸収ミラーの機能を有することを特徴とする請求項10に記載の光学素子。

【請求項12】 波形整形の機能を有することを特徴とする請求項1～7のいずれか1に記載の光学素子。

【請求項13】 1.2～2.0 μm 帯において波形整形の機能を有することを特徴とする請求項12に記載の光学素子。

【請求項14】 前記薄膜が光ディスクの記録面に形成されてなり、超解像光ディスクの機能を有することを特徴とする請求項1～7のいずれか1に記載の光学素子。

【請求項15】 請求項1～7のいずれか1に記載の光学素子の製造方法であって、シングルウォール・カーボンナノチューブを分散媒に分散させて分散液を調製し、該分散液を被塗物にスプレー塗布することにより薄膜を形成することを特徴とする光学素子の製造方法。

【請求項16】 前記被塗物が、基板であることを特徴とする請求項15に記載の光学素子の製造方法。

【請求項17】 前記被塗物が、光学材料または光学素子であることを特徴とする請求項15に記載の光学素子の製造方法。

【請求項18】 前記分散媒が、アルコールであることを特徴とする請求項15～17のいずれか1に記載の光学素子の製造方法。

【請求項19】 前記シングルウォール・カーボンナノチューブの直径が、1.0～1.6 nmであることを特徴とする請求項15～18のいずれか1に記載の光学素子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、シングルウォール・カーボンナノチューブの有する可飽和吸収機能を利用して、通信波長域の光を制御可能な光学素子およびその製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】近年発見されたカーボンナノチューブは、チューブ状材料であり、理想的なものとしては炭素六角網目のシート状の構造（グラフェンシート）がチューブの軸に平行になって管を形成し、さらにこの管が多重になることもある。このカーボンナノチューブは炭素でできた六角網目の繋り方や、チューブの太さにより金属的あるいは半導体的な性質を示すことが理論的に予想され、将来の機能材料として期待されている。

【0003】直径がカーボンファイバーよりも細い1 μm 以下の材料は、通称カーボンナノチューブと呼ばれ、カーボンファイバーとは区別されているが、特に明確な境界はない。狭義には、炭素の六角網目のグラフェンシートが、チューブの軸に平行に管を形成したものをカーボンナノチューブと呼ぶ（なお、本発明においてカーボンナノチューブとは、この狭義の解釈が適用される。）。

【0004】一般的に狭義のカーボンナノチューブは、さらに分類され、六角網目のチューブが1枚の構造のものはシングルウォール・カーボンナノチューブ（以下、単に「SWNT」という場合がある。）と呼ばれ、一方、多層の六角網目のチューブから構成されているものはマルチウォール・カーボンナノチューブ（以下、単に「MWNT」という場合がある。）と呼ばれている。どのような構造のカーボンナノチューブが得られるかは、合成方法や条件によってある程度決定される。

【0005】なかでもSWNTについては、カイラルベクトルに対応して金属的または半導体的性質を示す多様性に著目して、電気電子素子への応用が主として考えられてきた（「カーボンナノチューブの基礎」、斎藤弥八、坂東俊治著、（1998）コロナ社等を参照）。また高効率の電解電子放出特性を利用して、電界発光素子の特性を向上させる試みは実用化に近い段階にある（K. Matsumoto et al. Extend

ed Abstracts of the 2000 International Conference on Solid State Devices and Materials (2000) pp. 100-101等を参照)。しかし、これまでSWNTの光学的応用については十分に検討されてきたとは言えない。

【0006】光学的応用の場合、電気電子素子への応用の場合のように緻密なプローブによる単一のカーボンナノチューブへのアクセスは困難であり、直径数百nmから数十 μm に集光した光束によるカーボンナノチューブの集合体へのアクセスが主体となる。光学的応用の検討が電気電子素子への応用に比べ遅れているのは、光学評価に必要なスケールで高純度なSWNTの試料を得ることが困難だったこと、および、SWNTが溶媒に溶け難く光学的に均質な膜を得るのが困難だったこと、などが主な理由と考えられる。

【0007】SWNTの光学的応用を目指した非線形光学定数の評価は報告例があるが、溶液状態のSWNTを、非共鳴領域である1064nm、532nmおよび820nmで評価したものであり、実用性を期待させるような大きな非線形性は報告されていない(X. Liu et al. Appl. Phys. Lett., 74 (1999) pp. 164-166, Z. Shi et al. Chem. Commun. (2000) pp. 461-462)。

【0008】一方、SWNTは通信波長領域(1.2~2 μm)である1.8 μm に吸収を持つことが知られている(H. Kataura et al. Synth. Met., 103 (1999) p. 2555-2558)。この吸収帯の共鳴効果を直接利用できれば、同波長帯において大きな非線形性を実現できる可能性がある。我々は以上の考えに基づき、通信波長領域で動作する光学素子へのSWNTの応用について検討した。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】通信波長領域で動作する光学素子は、ほとんどが半導体材料または非線形光学結晶により形成されている。これらは非常に製造コストが高く、所定の機能を達成するために特別な設計が必要となる。したがって、本発明の目的は、光学素子へSWNTを応用することで、通信波長領域で動作可能で、かつ極めて低コスト・高効率な非線形の光学素子およびその製造方法を提供することにある。

【0010】

【課題を解決するための手段】SWNTにより通信波長領域で動作する光学素子を形成するには、これまで検討されて来なかった同波長領域でのSWNTの非線形光学特性を評価する必要がある。我々はこれを評価し、SWNTが通信波長領域で極めて高い可飽和吸収機能を有することを見出した。同時にSWNTを用いて種々の光学素子を作製し、その機能を確認した。また既存の光学素子

または光学材料表面にSWNT薄膜を形成することで、もとの光学素子または光学材料に、可飽和吸収の機能を付与できることを確認した。すなわち、本発明は、

【0011】<1> シングルウォール・カーボンナノチューブが積層された薄膜を有し、かつ、その可飽和吸収機能を利用することを特徴とする光学素子である。

<2> 前記薄膜が、基板表面に形成されてなることを特徴とする<1>に記載の光学素子である。

【0012】<3> 前記薄膜が、光学材料表面または光学素子表面に形成されてなることを特徴とする<1>に記載の光学素子である。

<4> 前記薄膜が、シングルウォール・カーボンナノチューブを分散媒に分散させた分散液を用い、これをスプレー塗布することにより形成された薄膜であることを特徴とする<1>~<3>のいずれか1に記載の光学素子である。

【0013】<5> 前記分散媒が、アルコールであることを特徴とする<4>に記載の光学素子である。

<6> 前記シングルウォール・カーボンナノチューブの1.2~2.0 μm 帯における可飽和吸収を利用することを特徴とする<1>~<5>のいずれか1に記載の光学素子である。

<7> 前記シングルウォール・カーボンナノチューブの直径が、1.0~1.6nmであることを特徴とする<6>に記載の光学素子である。

<8> 前記薄膜の可飽和吸収に伴う透過率変化により、光スイッチング動作を示すことを特徴とする<1>~<7>のいずれか1に記載の光学素子である。

【0014】<9> 1.2~2.0 μm 帯において光スイッチング機能を有することを特徴とする<8>に記載の光学素子である。

<10> 前記薄膜が鏡面体表面に形成されてなり、可飽和吸収ミラーの機能を有することを特徴とする<1>~<7>のいずれか1に記載の光学素子である。

【0015】<11> 1.2~2.0 μm 帯において可飽和吸収ミラーの機能を有することを特徴とする<10>に記載の光学素子である。

<12> 波形状の機能を有することを特徴とする<1>~<4>のいずれか1に記載の光学素子である。

【0016】<13> 1.2~2.0 μm 帯において波形状の機能を有することを特徴とする<12>に記載の光学素子である。

<14> 前記薄膜が光ディスクの記録面に形成されてなり、超解像光ディスクの機能を有することを特徴とする<1>~<7>のいずれか1に記載の光学素子である。

【0017】<15> <1>~<7>のいずれか1に記載の光学素子の製造方法であって、シングルウォール・カーボンナノチューブを分散媒に分散させて分散液を調製し、該分散液を被塗物にスプレー塗布することによ

り薄膜を形成することと特徴とする光学素子の製造方法である。

【0018】＜16＞ 前記被塗物が、基板であることを特徴とする＜15＞に記載の光学素子の製造方法である。

＜17＞ 前記被塗物が、光学材料または光学素子であることを特徴とする＜15＞に記載の光学素子の製造方法である。

【0019】＜18＞ 前記分散媒が、アルコールであることを特徴とする＜15＞～＜17＞のいずれか1に記載の光学素子の製造方法である。

＜19＞ 前記シングルウォール・カーボンナノチューブの直径が、1.0～1.6 nmであることを特徴とする＜15＞～＜18＞のいずれか1に記載の光学素子の製造方法である。

【0020】

【発明の実施の形態】以下、本発明の光学素子およびその製造方法について、詳細に説明する。

＜本発明の光学素子およびその製造方法の詳細＞カーボンナノチューブには、炭素の六角網目構造のチューブが1枚の構造のシングルウォール・カーボンナノチューブと、多層（多重壁）の前記チューブから構成されているマルチウォール・カーボンナノチューブと、があるが、本発明においては、高い可飽和吸収機能を有するシングルウォール・カーボンナノチューブが用いられる。

【0021】用いるSWNTとしては、その直径が、1.0～1.6 nmであることが好ましい。直径が上記範囲のSWNTを用いることで、有効に可飽和吸収の機能が発現される。本発明の光学素子では、1.5 μ m帯に見られるSWNTの1次元ファンホーベ特異点に起因する、バンド間遷移に伴う1次元エキシトンの光吸収を利用している。この吸収の波長はSWNTの直径により大きく変化する。SWNTのエネルギーギャップが、直径の逆数に比例するためである。

【0022】この吸収以外の1.5 μ m帯のSWNTの基礎吸収は、それほど大きくないため、たとえ、多種類のSWNTが混在していたとしても、機能を発揮することができ。使用したい波長で当該吸収を示すSWNTが相当量混入していれば、相応の光吸収が期待でき、その他のSWNTが吸収に大きな影響を与えないからである。しかし、著しく直径分布が広がれば、当該SWNT以外のSWNTによる光吸収（これは、紫外にある π プラズモンの裾吸収に当たるものなので、可飽和吸収の効果がない）が大きく影響を与え、得られる光学素子の性能を著しく悪化させてしまう場合がある。したがって、使用するSWNTの直径分布としては、当該波長に吸収を持つチューブを中心として、なるべくシャープな分布であることが望ましい。

【0023】用いるSWNTの製造方法としては、特に制限されるものではなく、触媒を用いる熱分解法（気相

成長法と類似の方法）、アーク放電法、およびレーザー蒸発法等、従来公知のいずれの製造方法を採用しても構わない。既述の如く、本発明においては、シャープな直径分布のSWNTを用いることが望まれる。現在、シャープな直径分布を実現するのは、レーザー蒸発法とアーク放電法である。しかし、アーク放電法のSWNTは、触媒金属を多く含む（これは当然、素子の働きに寄与しない）、高純度に精製することが困難である。したがって、本発明においては、レーザー蒸発法によるSWNTを用いることが望ましい。勿論、CVD法等で、直径のそろったSWNTが作製できれば、それを使用しても全く問題ない。

【0024】以下に、レーザー蒸発法により、本発明に好適なシングルウォール・カーボンナノチューブを作製する手法について例示する。原料として、グラファイトパウダーと、ニッケルおよびコバルトの微粉末（混合比はモル比で各0.45%）と、の混合ロッドを用意した。この混合ロッドを665 hPa（500 Torr）のアルゴン雰囲気下、電気炉により1250℃に加熱し、そこに350 mJ/PulseのNd:YAGレーザーの第二高調波パルス照射し、炭素と金属微粒子を蒸発させることにより、シングルウォール・カーボンナノチューブを作製した（以上、作製操作A）。

【0025】以上の作製手法は、あくまで典型例であり、金属の種類、ガスの種類、電気炉の温度、レーザーの波長等を変更しても差し支えない。また、レーザー蒸発法以外の作製法、例えば、CVD法（Chemical Vapor Deposition: 化学蒸着法）やアーク放電法、一酸化炭素の熱分解法、微細な空孔中に有機分子を挿入して熱分解するテンプレート法、フラーレン・金属共蒸着法等、他の手法によって作製されたシングルウォール・カーボンナノチューブを使用しても差し支えない。

【0026】各種方法により得られるSWNT試料は、作製法にも依存するが、そのままだでは多かれ少なかれ、必ず不純物が含まれる。性能の良好な光学素子を得るには、SWNT試料を精製することが望ましい。精製方法は特に限定されないが、例えば、既述のNiCoの金属微粒子を用いたレーザー蒸発法（作製操作A）によるSWNT試料は、以下の手順で精製を行うことができる。

【0027】1. 真空中熱処理

不純物として含まれるフラーレンを昇華させ、取り除くために、真空中で熱処理を行う。このとき、真空条件としては 10^{-14} Pa程度とし、温度条件は1250℃程度とする。

【0028】2. トルエンによる洗浄の後、ろ過
真空中熱処理の後には、トルエンによる洗浄を行う。洗浄に際しては、SWNT試料をトルエンに分散させ、攪拌させる。その後、ろ過を行う。ろ過の際は、SWNTが十分にろ別される程度の細かさのメッシュを用いる

(以下の工程における処理についても同様)。

【0029】3. エタノール中へ分散した後、ろ過トルエンによる洗浄およびろ過の後には、純水分散液を作るための前処理として、エタノール中への分散を行う。分散の後には、ろ過を行う。

【0030】4. 純水中への分散

エタノール中への分散およびろ過の後には、純水中へ分散させ、純水分散液を作る。

【0031】5. 過酸化水素水の添加

得られた純水分散液に過酸化水素水を加えて、全体として過酸化水素の分量(体積基準)が15%になるように調整する。

【0032】6. 還流操作の後、ろ過

過酸化水素水の添加された純水分散液は、含有される不純物としてのアモルファスカーボンを燃焼させるため、還流装置で3時間100℃に保って還流操作を行う。その後、ろ過を行う。

【0033】7. 希塩酸で洗浄した後、ろ過

還流操作およびろ過の後には、NiCoの金属微粒子を除去するため、希塩酸で洗浄する。洗浄に際しては、SWNT試料を希塩酸中に分散させ、攪拌させる。その後、ろ過を行う。

【0034】8. 水酸化ナトリウム水溶液により洗浄した後、ろ過

希塩酸による洗浄およびろ過の後には、残留塩酸の中和、並びに、酸処理による副生成物の除去の目的で、水酸化ナトリウム水溶液により洗浄する。洗浄に際しては、SWNT試料を水酸化ナトリウム水溶液中に分散させ、攪拌させる。その後、ろ過を行う。

【0035】9. 真空中650℃で1時間保つ

水酸化ナトリウム水溶液による洗浄およびろ過の後には、試料に含まれる各種溶媒の除去の目的で、真空(10⁻⁴ Pa程度)中650℃で1時間保つ。

【0036】10. 常温になるまで放冷

その後、常温になるまで放冷すること、極めて純度の高いSWNTを作製することができる(以上1~10の全工程で精製操作)。因みに、本発明者において実施された操作では、純度90%以上、金属微粒子をほとんど含まない、高純度SWNTが得られた。

【0037】なお、同様の純度に精製することが可能であれば、その手法は問わない。例えば、慎重に空气中で加熱してアモルファスカーボンを燃焼させることも可能であるし、希硝酸や濃硝酸を用いて精製する手法もあり、本発明に用いるSWNTの精製にこれらを用いても何ら差し支えない。

【0038】以上のSWNTが積層された薄膜を形成することで本発明の光学素子が得られる。かかる薄膜の形成方法としては、最終的にSWNTが積層された薄膜となるような形成方法であれば、特に制限されるものではなく、具体的には例えば、スプレー法、電気泳動製膜

法、ボリマー分散法等が挙げられる。以下、これらの薄膜形成方法について述べる。

【0039】(スプレー法) 前記スプレー法とは、前記SWNTを分散媒に分散させた分散液を用い、これをスプレー塗布することにより薄膜を形成する方法である。精製されたSWNTを適当な分散媒に分散させることで、分散液が調製される。用いることができる分散媒としては、アルコール、ジクロロエタン、ジメチルフォルムアミド等が挙げられ、ジクロロエタン、ジメチルフォルムアミドは分散性が非常に良好であり、得られる薄膜の膜質が良好となる点で好ましいが、これらは若干揮発性が低いため、後述のスプレー塗布に際して、被塗物の温度を高く保ったり、スプレー量も減らして時間をかけて製膜する等の工夫が必要となる。これに対して、アルコールは、揮発性が高い点で好ましい。かかるアルコールとしては、メタノール、エタノール、イソプロピルアルコール(IPA)、n-プロピルアルコール等が挙げられるが、これらのなかでも、特にエタノールが好ましい。

【0040】分散液の調製の際には、必要に応じて界面活性剤等の添加剤を用いることもできる。界面活性剤としては、一般に分散剤として用いられるものが好適に用いられる。好ましくは、極性を有するものや、化学的にSWNTと結合しやすい官能基を有するもの等が挙げられる。

【0041】分散液におけるカーボンナノチューブの濃度としては、特に限定されないが、分散媒としてエタノールを用いた場合には、1~2 mg/mlの範囲とすることが好ましい。

【0042】前記SWNTおよび必要に応じて添加される前記添加剤を、前記分散媒に投入した後、前記SWNTを均一に分散するために、分散媒に十分に攪拌しておくことが望ましい。攪拌に用いる装置としては、特に限定されず、攪拌羽模式攪拌装置、ニーダー、ロールミル、超音波分散器等が挙げられるが、なかでも超音波分散器が好ましい。

【0043】以上のようにして得られた分散液を所定の被塗物にスプレー塗布する。スプレー塗布の手法としては、特に限定されず、公知の装置、条件等により行うことができ、例えば、エアブラシにより行うことができる。このとき、エタノール等の分散媒中のSWNTは凝集しやすいため、エアブラシの液だめに超音波をかけて分散させることも効果がある。また、スプレー塗布において、被塗物の温度が低いと分散媒がなかなか蒸発せず、被塗物表面でSWNTが凝集し、大きな塊となって、膜質が悪化する場合がある。したがって、ドライヤーで熱風を同時に吹き付けたり、ヒーターにより被塗物を直接加熱することにより、被塗物の温度を上げて、吹き付けた溶液が瞬時に蒸発するようにすることが好ましい。

【0044】(電気泳動製膜法) 精製されたSWNTをジメチルホルムアミド等スプレー法と同様の分散媒に、0.4～0.5 mg/ml程度の濃度で分散し、そこに50質量%水酸化ナトリウム水溶液を1質量%(外添)程度加える。この分散液中に、1対の電極を1センチメートルほど離して挿入し、両電極間に直流電圧を印加する。電圧は20V程度とすることが好ましい。通電により、正の電極表面にSWNTが泳動して、堆積し製膜される。すなわち、この方法においては、正の電極が被塗物となる。

【0045】(ポリマー分散法) 前記ポリマー分散法とは、精製されたSWNTをポリスチレン等のポリマーの有機溶媒溶液中に分散し、それをスピコーター等任意の塗布手段で被塗物表面に塗布する方法であり、当該方法によれば均一な膜が得られ、有効な手法である。ただし、使用するポリマーによっては、SWNTの化学的安定性が劣化するという欠点を持つ。

【0046】使用可能なポリマーとしては、製膜可能なものであれば採用可能であるが、SWNTへの影響が少ない、ポリスチレン等が好ましい。また、有機溶媒としては、用いるポリマーを溶解し得るものを適宜選択すればよい。有機溶媒溶液中のポリマーの濃度は、塗布適性により適宜調整すればよく、また、SWNTの濃度も、所望とするSWNT薄膜中のSWNTの量に依りて、適宜調整すればよい。

【0047】(その他の方法) SWNT製造装置内に基板等の被塗物を挿入し、直接被塗物表面にSWNTを捕集するというのも効果的である。製膜後に、空气中酸化法により不純物であるアモルファスカーボンを除去し、真空中高温加熱昇華法により金属触媒を除去すれば、十分純度の高いSWNTに精製可能であり、利用可能なSWNT薄膜を得ることができる。

【0048】以上のようにして、本発明に特徴的なSWNT薄膜が形成される。形成されるSWNT薄膜におけるSWNTの付着量としては、当該SWNT薄膜に十分な可飽和吸収機能を発現させるためには、目的とする波長での透過率が、0.1～10%程度にすることが好ましく、1%程度にすることがさらに好ましい。

【0049】SWNT薄膜が形成される被塗物としては、ガラス基板や石英基板等の基板、光学材料または光学素子等が挙げられる。基板を被塗物とした場合、形成されるSWNT薄膜の可飽和吸収機能そのものを利用した光学素子を製造することができる。光学材料または光学素子を被塗物とした場合、これらの光学的機能に対して、形成されるSWNT薄膜の可飽和吸収機能を付加した光学素子を製造することができる。具体的な被塗物については、後述の各実施形態のなかで述べることとする。

【0050】以上のようにして得られたSWNT薄膜は、赤外領域に複数の吸収帯を示すものとなる。最も低

エネルギーの吸収帯は、通信波長領域である1.2～2 μ m付近に位置し、吸収ピーク波長は1.78 μ m程度となる。したがって、前記SWNT薄膜が形成された光学素子は、当該膜の可飽和吸収機能を利用することで、通信波長領域で動作可能なものとなる。

【0051】このように、SWNT薄膜を通信波長領域における可飽和吸収材料として用いた場合、半導体材料に比べ次のような特徴を有すると考えられる。第一に、半導体素子のコストを極めて低く抑えることができる。SWNTは、他の半導体材料に比べて比較的原材料が安価であり、大量生産が可能である。加えて半導体QWのような真空プロセスによる量子構造形成過程を必要とせず、基板等の被塗物の表面に直接薄膜を形成するだけで済むことから、製造が簡単に歩留まりも良い。これらのことから半導体材料に比べ数倍低いコストで光学素子を製造することが可能であると予想される。

【0052】第二に、製造現場で既存の光学素子にSWNT薄膜を形成することで、光学素子に簡単に可飽和吸収機能を付与することができる。例えば、反射鏡(鏡面体)の表面にSWNT薄膜を形成することで、入射光強度によって反射率が可変となるミラーを簡単に作製することができる。従来の半導体材料を用いた場合、真空プロセスにより反射鏡の上に直接量子井戸層を形成する必要があったが、SWNT薄膜を形成するのみである本発明によれば、既存の光学素子の作製コストを大幅に引き下げることができるだけでなく、これまで膜形成が困難だった部分に可飽和吸収膜を形成することが可能になることで、従来になかった光学素子を生み出すことも可能である。

【0053】第三に、大面積な薄膜を容易に得ることができる。従来の半導体材料で同様の機能を有する薄膜を形成しようとする、ある程度大面積化するとは可能であったとしても、そのためには、より大きな真空装置を必要とすることから製造コストが極めて高くなってしまう。SWNT薄膜の場合、スプレー塗布等簡易な塗布法により薄膜化が可能ことから、得られる膜面積に制限がなく、また形成操作自体も容易である。

【0054】第四に、材料の耐久性としては、SWNTが炭素原子のsp²共役結合という強固な結合のみから構成され、また電気伝導性が高く熱が溜まりにくいことから、極めて高い耐久性・耐光性が期待される。また、SWNTは、空气中で安定で、約500℃まで燃えないため、空气中高温下で使用することができる。真空中では、1600℃まで構造を変化させないため、さらに高温で使用可能となる。

【0055】<SWNT薄膜の可飽和吸収機能の検証> 本発明で形成されるSWNT薄膜の可飽和吸収機能について、実際にSWNT薄膜を形成して、以下のように検証した。まず、SWNTとしては、既述のNiCoの金属微粒子を用いたレーザー蒸発法(作製操作A)により

製造し、既述の精製操作Bによって精製したものをを用いた。

【0056】上記SWNT1~2mgをエタノール5mlに超音波分散器により分散させた液体を、石英基板の表面に吹き付けることにより、SWNT薄膜を形成した。このとき、ドライヤーで熱風を同時に吹き付けることにより、石英基板の温度を上げて、吹き付けた溶液が瞬時に蒸発するようにした。

【0057】得られたSWNT薄膜は黒色であり、横軸に前記SWNT薄膜に照射された光エネルギー、縦軸に前記SWNT薄膜の吸光度をプロットした図1のグラフに示されるように、赤外領域に複数の吸収帯を示すものであった。最も低エネルギーの吸収帯の部分を抜き出し、かつ、横軸を光波長に置き換えたグラフを図2に示す。図2に示されるように、最も低エネルギーの吸収帯は1.5~2μm付近に位置し、吸収ピーク波長は1.78μmであった。ラマンスペクトルおよびSTM観測から、SWNTの直径は、1.2~1.6nmの範囲に分布していると推測される。

【0058】SWNT薄膜について、Z-scan法と称される手法で、可飽和吸収機能を測定した。可飽和吸収とは3次の非線形光学効果の一種で、吸収波長に一致した強いレーザ光の照射下で上位準位に多量の電子が励起され、該状態下での電子励起が抑制されることにより、一時的に吸収が減少する現象である。

【0059】図3は、Z-scan法を説明するための概略構成図である。Z-scan法では、レーザ光をUVカットフィルター1やNDフィルター2等のフィルターを介してレンズ3に入射させ、レンズ3と受光器5との間の略中間点（焦点X）に集光させる。そして、レーザ光の進行方向に沿って、レンズ3側から受光器5側に向けて、測定対象となる試料4を移動させる。試料4の位置Zについて、焦点Xを0（ゼロ）として、焦点Xからレンズ3側の位置を-（マイナス）で表記し、受光器5側の位置を+（プラス）で表記すると、試料4に照射される光量がZ=0にて最も大きくなり、それよりも+方向ないし-方向に隔たるほど光量が小さくなっていく。すなわち、試料4の位置Zを動かすだけで、試料4に照射する光量の大小による透過率の変化を受光器5により測定することができる。

【0060】前記得られたSWNT薄膜（石英基板付き）を試料4として、焦点X付近での透過率増加から、吸収飽和に基づく吸光度の減少を見積もった。レーザ光源にはフェムト秒レーザ光を用い、測定波長は、Optical Parametric Amplifier（OPA）により、SWNT薄膜の吸収ピークである1.78μmに合わせた。

【0061】測定した結果のグラフを図4に示す。図4において、横軸は試料の位置（Z）、縦軸はZ=-25（mm）の位置での透過率を1とした場合の規格化され

た透過率（ $\Delta T/T$ ）を示す。Z=0（焦点）付近で吸収変化に基づく透過率増加が見られることから、前記SWNT薄膜は赤外領域の吸収帯について吸収飽和を起こすことがわかった。

【0062】前記SWNT薄膜の膜厚を100nmと想定して、入射光強度から非線形光学定数を見積もると約 10^{-6} esuとなる。これは、性能指数では現在の主要な光スイッチング素子用材料である半導体量子井戸（QW）の一桁落ち程度であり、溶液分散状態から簡単に薄膜化可能な材料としては非常に有望な値である。ちなみに、SWNT同様に簡単に薄膜化が可能であり、高い非線形性を有する有機非線形光学材料として知られているフタロシアニンの非線形光学定数は、 10^{-10} ~ 10^{-12} esuである。このことから、SWNTは赤外領域での可飽和吸収材料として非常に有望であることが確認された。

【0063】＜本発明の光学素子の実施形態＞次に、本発明の光学素子について、いくつかの好ましい実施形態を挙げて説明する。

（1）光スイッチ

上記＜SWNT薄膜の可飽和吸収機能の検証＞において説明した方法と同様にして、ガラス基板上にSWNT薄膜を形成し、光スイッチング動作を示す光学素子を製造した。吸収ピーク波長は1.78μm、吸光度は1.3であった。

【0064】得られた光学素子を透過率変化型的光スイッチとして動作させた。かかる実験の概要を図5に示す。図5において、10は光スイッチング機能を有する光学素子であり、ガラス基板12の表面にSWNT薄膜が形成されてなるものである。制御光波長、信号光波長はともに1.78μmとし、制御光の有無での透過光量変化を受光器5としてのパワーメーターにより測定した。制御光、信号光はフェムト秒レーザ光をOPAにより波長変換して作製した。パルス幅は200fs、繰返し周期1kHzであった。実験の結果、制御光の透過率を0.36mJ/cm²・pulseとした時、透過光量が60%増加することが観測された。このことから、SWNT薄膜11が可飽和吸収を利用した光スイッチとして機能することが確認された。したがって、本実施形態の光学素子は、1.2~2.0μm帯において光スイッチング機能を有する光学素子（光スイッチ）として利用することができる。

【0065】（2）可飽和吸収ミラー

図6に示されるように、ガラス基板12の表面に銀（Ag）のミラー層14がコートされたAgコートミラー（光学素子）の表面に、前記＜SWNT薄膜の可飽和吸収機能の検証＞において説明した方法と同様にしてSWNT薄膜11を形成し、可飽和吸収ミラーの機能を有する光学素子を製造した。

【0066】得られた光学素子について、反射光強度の

照射光強度依存性を測定した。その結果、波長 $1.78\mu\text{m}$ 、パルス幅 200fs のレーザ光照射下において、照射光強度が $10\mu\text{J}/\text{cm}^2\cdot\text{pulse}$ を越える付近から反射光強度の増加が観測され、反射光強度は、照射光強度 $300\mu\text{J}/\text{cm}^2\cdot\text{pulse}$ で照射光強度が $10\mu\text{J}/\text{cm}^2\cdot\text{pulse}$ の約2倍に達した。このことから、SWNT薄膜11を表面に形成したAgコートミラーが、可飽和吸収ミラーとして機能することが確認された。したがって、本実施形態の光学素子は、 $1.2\sim 2.0\mu\text{m}$ 帯において可飽和吸収ミラーの機能を有する光学素子として利用することができる。

【0067】(3) 波形成形器

可飽和吸収機能を有するSWNT薄膜を利用すると、入射光パルスの時間幅を短縮するような波形成形の機能を有する光学素子を形成することが可能である。当該光学素子の構成としては、基本的に前記「(1) 光スイッチ」と同様である。

【0068】本発明の光学素子を波形成形の機能を有する波形成形器として用いた場合の波形成形の原理を説明するためのグラフを図7に示す。図7のグラフにおいて、横軸は時間であり、縦軸は入射光パルスの光強度である。時間軸上で考えた場合、本発明の光学素子は、パルスの前後端における光強度の弱い付近では、透過率が低く、パルス中央部の光強度が高い付近では透過率が高くなる。その結果、SWNT薄膜を透過したパルスは、パルスの前後端がカット（減少を含む）されて、元のパルスより時間幅が短くなる。

【0069】波形成形実験を、赤外用OPAシステムにより行った。本赤外用OPAシステムにおけるレーザ光としては、パルス幅 $4\sim 6\text{ns}$ 、繰返し 10Hz の赤外光が発振可能である。十分なピーク光強度を得るため、SWNT薄膜上に、波長 $1.78\mu\text{m}$ 、 3mW の出力光を約 $50\mu\text{m}$ に集光して測定した。SWNT薄膜を透過した光の時間幅をフォトデテクタで観測した結果、元のパルス幅に比べ 30% 程度の時間幅の短縮が観測された。このことから、SWNT薄膜が波形成形器として機能することが確認された。したがって、本実施形態の光学素子は、 $1.2\sim 2.0\mu\text{m}$ 帯において波形成形の機能を有する光学素子として利用することができる。

【0070】(4) 超解像光ディスク

本発明の光学素子を波形成形器として利用する場合は、時間軸上でのパルス幅短縮を実現したが、同じ可飽和吸収機能を利用して、空間的なビーム径を縮小することができる。

【0071】図8は、空間的なビーム径を縮小することで超解像を実現する超解像光ディスクの機能を有する本発明の光学素子を示す模式断面図である。図8において、ポリカーボネート樹脂、アクリル樹脂、ポリオレフィン樹脂等のプラスチック材料からなる基板21の片面にビット23が形成され、その上（ここで言う「上」と

は、重力方向における上ではなく、層の積層方向を指すものである。以下同様。）に金、銀、アルミニウム、白金、銅などの金属や、これらを含む合金等からなる反射層22が設けられ、さらにその上に保護層24が設けられてなる光ディスク25の、基板21側の面（当該面を以下「記録面」という。なお、本発明において、「記録面」とは、照射ビームの入射側の面を言う。）に、SWNT薄膜11が形成されてなるものである。なお、光ディスク25の層構成は、図8に示されるものに限定されるものではない。

【0072】レーザ光は、ガウス型のビームパターンを持つため、中央部では周辺部に比べ光強度が大きい。そのため、光ディスク25の記録面にSWNT薄膜11を形成すると、記録面側からレーザ光が照射された際、SWNT薄膜11の可飽和吸収機能により、照射ビームの中央の一部分のみ光が透過する。この効果により、ビームの集光限界より小さいスポットを光ディスク25の記録面に形成することが可能となる。かかる機能を有する光ディスクは、超解像光ディスクと称される。

【0073】前記<SWNT薄膜の可飽和吸収機能の検証>において説明した方法と同様にしてSWNT薄膜11を形成した図8に示す光学素子（超解像光ディスク）について、ビーム径の縮小の効果を観測した。レーザ光の照射には、前記波形成形実験に用いた赤外用OPAシステムを用いた。波長 $1.78\mu\text{m}$ の出力光をSWNT薄膜11の表面に集光して、ビームプロファイラにより観測し、もとの集光ビーム径と比較した。その結果、照射光強度が 1mW を越える付近からビームパターンに変化が現れ、ビーム中央部の輝度のみ選択的に増大した。最適条件（およそ 3mW ）では、元のビーム径に比べ、半径で 60% 程度までビーム径を縮小することができた。このことから、SWNT薄膜が超解像光ディスク用材料として機能することが確認された。したがって、本実施形態の光学素子は、超解像光ディスクの機能を有する光学素子として利用することができる。

【0074】このように、SWNT薄膜の可飽和吸収機能を利用する本発明の構成によれば、外部制御光により信号光を能動的に制御可能な光スイッチなどの能動的素子、および信号光自身により信号光が受動的に制御される可飽和吸収ミラーなどの受動的素子を任意に作製することができる。

【0075】以上、SWNT薄膜の可飽和吸収機能を利用した本発明の光学素子の実施形態を4つ挙げて説明したが、本発明は、ここに述べた態様のみに留まるものではなく、SWNT薄膜の共鳴励起による可飽和吸収機能を利用して作製された光学素子全般に及ぶものである。

【0076】

【本発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、光学素子へSWNTを応用することで、通信波長領域で動作可能で、かつ極めて低コスト・高効率な非線形

の光学素子およびその製造方法を提供することができる。本発明は、既存の光学素子または光学材料に特定の機能を簡単に付与できるなど、通信波長領域の非線形光学素子の製造において寄与するところが極めて大きい。

【図面の簡単な説明】

【図1】 SWNT薄膜の赤外領域における吸収特性を示したグラフであり、横軸にSWNT薄膜に照射された光エネルギー、縦軸にSWNT薄膜の吸収度をプロットしたものである。

【図2】 図1のグラフにおいて、最も低エネルギーの吸収帯の部分を抜き出し、かつ、横軸を光波長に置き換えたグラフである。

【図3】 Z-scan法を説明するための概略構成図である。

【図4】 Z-scan法により、SWNT薄膜の可飽和吸収を測定した結果を示すグラフである。

【図5】 本発明の光学素子を透過率変化型的光スイッチとして動作させた実験の概要を示す概略構成図である。

【図6】 可飽和吸収ミラーの機能を有する光学素子の実施形態を示す模式断面図である。

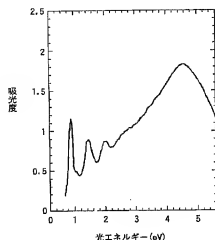
【図7】 本発明の光学素子を波形整形の機能を有する波形整形器として用いた場合の波形整形の原理を説明するためのグラフであり、横軸に時間、縦軸に入射光パルスの光強度をプロットしたものである。

【図8】 超解像光ディスクの機能を有する光学素子の実施形態を示す模式断面図である。

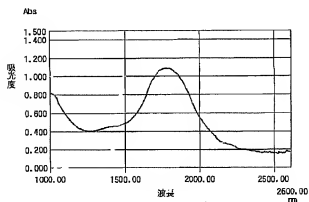
【符号の説明】

- 1 UVカットフィルター
- 2 NDフィルター
- 3 レンズ
- 4 試料（光学素子）
- 5 受光器
- 10 光学素子
- 11 SWNT薄膜（シングルウォール・カーボンナノチューブ薄膜）
- 12 ガラス基板（基板）
- 14 ミラー層
- 21 基板
- 22 記録層
- 23 ビット
- 24 光ディスク

【図1】



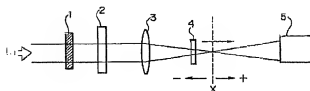
【図2】



【図6】



【図3】



サンプル名: SWNT

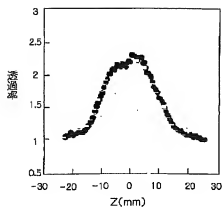
コメント: nanotube

メカニクススピード: 300(750)nm/min スリット (可視): 固定 5.00nm

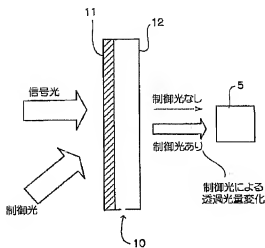
メリット (赤外): 自動制御 ホットマル電圧: 自動制御 P b a 感度: 2

ベースライン: ユーザ2 サンプリング間隔: 自動設定

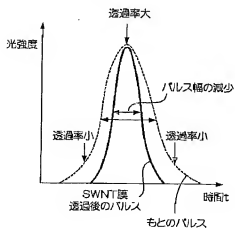
【図4】



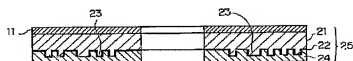
【図5】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

- (72)発明者 徳本 圓
茨城県つくば市東1-1-1 独立行政法
人産業技術総合研究所 つくばセンター内
- (72)発明者 辰浦 智
神奈川県足柄上郡中井町境430グリーンテ
クなかい 富士ゼロックス株式会社内
- (72)発明者 阿知波 洋次
東京都多摩市永山5-6-9

- (72)発明者 片浦 弘道
東京都八王子市みなみ野1-11-4-506
- Fターム(参考) 2H079 AA08 AA13 BA01 CA05 CA24
HA09
2K002 AA02 AA05 AB09 AB33 AB40
BA01 BA02 CA02 CA30 DA20
FA08 HA30
4G046 CA00 CC06 CC08
5D029 MA02
5D121 EE21